

履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶作业系统设计与试验

杨然兵^{1,2} 吕士亭¹ 张健^{2,3} 潘志国¹ 王伟静¹ 白翔宇¹

(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 2. 海南大学机电工程学院, 海口 570228;

3. 海南大学南繁学院(三亚南繁研究院), 三亚 572025)

摘要: 履带式马铃薯联合收获机转向半径小、通过性强、接地比压低,在马铃薯收获作业中应用越来越广泛。为提高履带式马铃薯联合收获机的智能化水平,降低马铃薯收获过程中的劳动力强度,以洪珠4ULZ-110型履带式马铃薯联合收获机为试验平台,设计履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶作业系统,并通过加装电子比例阀实现收获机的转向机构和挖掘机构电-液可控。在航向偏差PD控制器的基础上,增加横向偏差的比例项,并引入行驶速度自适应的控制延时补偿前馈项,设计前馈+反馈复合路径跟踪控制算法。在水泥路面和旱地分别以速度0.55、0.83、1.11 m/s进行直线路径跟踪控制试验,并以速度0.55 m/s在胶州马铃薯种植地进行了辅助驾驶收获作业。试验结果表明,所设计的马铃薯收获机辅助驾驶作业系统设计功能执行可靠,收获作业过程中最大绝对横向偏差为5.10 cm,平均绝对偏差为2.00 cm,收获行走过程中具有较好的稳定性和直线路径跟踪精度,满足马铃薯收获机田间作业要求。

关键词: 马铃薯收获机; 履带式; 辅助驾驶作业系统; 控制算法

中图分类号: S225.7; S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)12-0231-08

OSID:



Design and Test of Assisted Driving Operation System of Tracked Potato Combine Harvester

YANG Ranbing^{1,2} LÜ Shiting¹ ZHANG Jian^{2,3} PAN Zhiguo¹ WANG Weijing¹ BAI Xiangyu¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China

3. School of Breeding and Multiplication(Sanya Institute of Breeding and Multiplication), Hainan University, Sanya 572025, China)

Abstract: The tracked potato combine harvester features a small turning radius, strong passability, and low ground pressure, making it increasingly popular in potato harvesting operations. In order to improve the intelligence level of tracked potato combine harvester and reduce the labor intensity in the process of potato harvest, the Hongzhu 4ULZ-110 model tracked potato combine harvester was used as the experimental platform, an auxiliary driving operation system for tracked potato combine harvester was designed, and electro-hydraulic control of the harvester's steering mechanism and digging mechanism was achieved by installing electronic proportional valves. Building upon a heading deviation PD controller, a proportional term for lateral deviation was incorporated and a control delay compensation feedforward term adaptive to driving speed was introduced, resulting in a composite feedforward + feedback path tracking control algorithm. Straight-line path tracking control experiments on cement roads and dry land were conducted at speeds of 0.55 m/s, 0.83 m/s and 1.11 m/s, respectively. Additionally, assisted driving harvesting operations were performed at speed of 0.55 m/s in the potato planting fields in Jiaozhou. The experimental results demonstrated that the designed auxiliary driving operation system for the potato harvester functions was reliable. The maximum absolute lateral deviation during the harvesting operation was 5.10 cm, with an average absolute deviation of 2.00 cm, showcasing good stability and straight-line

收稿日期: 2024-01-15 修回日期: 2024-02-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2000904)、山东省自然科学基金项目(ZR2022MF306)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-09-P32)

作者简介: 杨然兵(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: yangranbing@163.com

通信作者: 张健(1982—),男,副教授,博士,主要从事农业导航装备研究,E-mail: zhangjian_qau@163.com

path tracking accuracy during harvesting travel, meeting the requirements for field operations of the potato harvester.

Key words: potato harvester; crawler; assisted driving operation system; control algorithms

0 引言

马铃薯是世界第四大主粮,中国马铃薯种植面积居世界第一位,随着“马铃薯主粮化战略”的实施推进,我国已成为世界马铃薯总产量最高的国家。然而,我国马铃薯生产智能化发展进程缓慢,生产过程中仍需要大量的人力资源,马铃薯收获环节耗费的人工时间和用工费用占整个生产过程一半。所以,提高马铃薯收获环节的少人化、智能化水平能有效提高劳动生产率、降低作业成本、促进农机智能化的发展,对增加马铃薯经济效益和推动马铃薯主粮化发展具有重要意义^[1-4]。

我国马铃薯种植主产区为北方一作区和西南混作区,种植地多为丘陵山地,牵引式马铃薯收获机转弯半径大、作业灵活性差,难以满足丘陵山区和小地块作业工况多变、地头空间小等作业需求^[5-6],履带式马铃薯联合收获机作业灵活,适应性强^[7],具有更大的实用价值和发展潜力^[8]。

另一方面,随着农业机械化和智能化水平的不断提高^[9],农业生产逐渐向规模化发展,为提高相关农业装备的作业效率和质量,提高作业精度,农机辅助驾驶技术已成为当前研究重点。目前农机辅助驾驶系统的研究多是基于轮式农业机械,利用电机方向盘、双天线定位装置、惯导传感器以及导航控制器实现其辅助驾驶作业^[10-11]。履带式农机是通过控制两侧履带差速进行转向,基于转向轮角的轮式车辆路径跟踪算法难以直接应用。针对履带式车辆导航,付拓等^[12]为履带车辆的转向过程构造虚拟转向角和虚拟驱动速度,将自动驾驶系统应用到履带式农机;王法安等^[13]提出了一种基于瞬时旋转中心的大角度转向控制算法,规划出最优的转向目标点,并控制履带车辆在该转向目标点一次性转向到所需航向;刘志杰等^[14]提出了基于虚拟雷达模型的导航路径跟踪控制算法,利用虚拟雷达图描述车辆与路径的位置关系,精准实现了履带式车辆的导航路径跟踪控制。但上述研究未考虑单边制动转向式履带式农机的路径跟踪控制问题,且由于马铃薯垄上种植的农艺要求,难以直接应用于单边制动转向履带式马铃薯联合收获机自动驾驶。

本文以洪珠 4ULZ-110 型履带式马铃薯联合收获机为试验平台,根据其操作机构以及单边制动差速转向机构设计整机电控系统;按照收获机田间

作业要求,设计辅助驾驶作业系统以及直线路径跟踪控制算法,最后通过田间试验验证该系统的可靠性和路径跟踪的准确性。

1 电控与辅助作业系统硬件设计

洪珠 4ULZ-110 型履带式马铃薯联合收获机为单边制动差速转向结构,整车采用机械式拉杆手动控制液压缸,完成行走速度、左右转向、挖掘铲升降、作业离合、粮仓升降、粮仓输送等作业操作。该收获机长×宽×高为 5 600 mm×2 300 mm×2 700 mm;履带接地长度为 1 770 mm;工作幅宽为 1 100 mm;履带板宽度为 300 mm;行驶速度为 0~6.5 km/h。

电气可控是实现辅助导航驾驶的基础。为保证收获机非作业时正常行走,增加的辅助驾驶功能不能影响人工驾驶功能。为此,对相关机械式操作结构进行改装,设计辅助驾驶电控系统^[15],原理如图 1 所示。

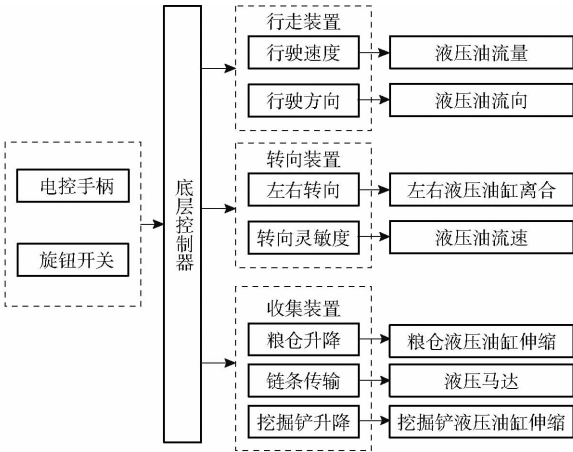


图 1 收获机底层电控系统原理图

Fig. 1 Schematic of electronic control system at bottom of harvester

1.1 行走及作业机构改进

收获机左、右履带由 2 个独立的液压马达驱动,采用三位四通换向阀控制液压马达^[16-18]实现收获机的前进、后退以及停止 3 种状态。通过调节液压流速可实现行驶速度调整,利用换向阀改变系统液压油路方向可实现液压马达正反转控制,通过左右离合器控制实现车辆转向。

为实现电液控制,选用 GJ1129 型双摇杆电控手柄输出模拟及开关量电控信号。手柄右侧摇杆输出 0~5 V 电压信号,经收获机底层控制器 A/D 采样之后驱动 4YZQP-4C 型比例电磁阀实现车速控

制;左侧摇杆为开关量信号,并联控制双侧驱动轮液压油的流向,实现收获机前进、后退和停止;该手柄顶部 6 个开关按钮输出 5V 开关量信号,实现收获机粮仓升降、粮仓传送带正反转、作业离合的功能。

选用 GJ60A 型电控手柄输出 4 路数字量电控信号,通过控制 4WE6H-L6X/EG24-N9K7 型电磁阀实现挖掘铲上升、下降和左右驱动轮离合控制。

以控制车辆左转为为例,手柄控制左侧电磁阀关断,齿轮箱主轴与左半轴分离,左驱动轮停止转动,在右驱动轮驱动下,收获机实现向左侧转向。同理,控制右侧电磁阀关断实现收获机向右侧转向。通过手柄前后拨动实现挖掘铲的升降。同时,为实现收获机稳定转向,该手柄还可输出模拟信号控制液压马达回油速度,实现转向灵敏度控制。改进后系统整体电控示意图如图 2 所示。

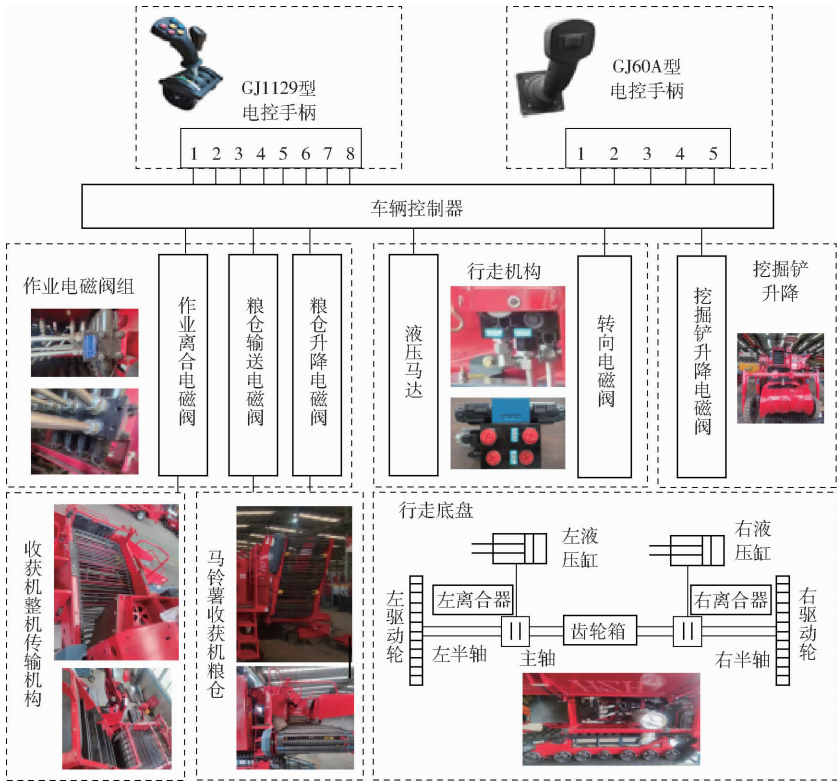


图 2 系统整体电控示意图

Fig. 2 Schematic of overall electronic control of system

1.2 辅助驾驶作业系统硬件设计

履带式马铃薯联合收获机田间作业辅助驾驶控制流程为:①当发动机点火启动,转向液压泵运转。②导航控制器实时获取车身惯导数据和卫星定位数据,并结合规划路径计算当前横向偏差和航向偏差。③主控芯片发出转向控制指令,功率输出模块控制液压比例电磁阀的开度、方向以及控制时间。④完成转向。辅助作业系统结构与功能如图 3 所示。

系统 (Global navigation satellite system, GNSS) 双天线定位装置、上位机控制屏等组成,如图 4 所示。

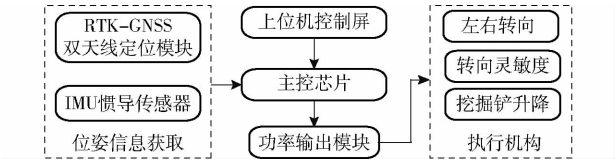


图 3 辅助作业系统结构与功能示意图

Fig. 3 Schematic of structure and function of auxiliary operating system

根据上述控制原理设计履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶作业系统,由导航控制器、全球导航卫星

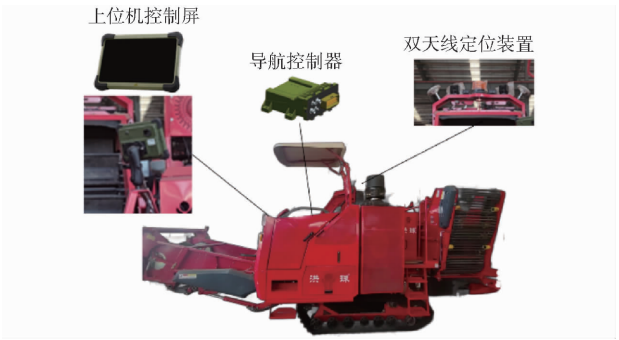


图 4 辅助驾驶系统构成图

Fig. 4 Constitution diagram of driver assistance system

其中,GNSS 定位装置由 2 个卫星天线以及 1 块全频高精度定位定向板卡组成。2 个卫星天线安装在车辆顶端,周围无金属遮挡,沿车辆中轴对称且间距大于 1.2 m,用于接收基于美国国家海洋电子协会 (National Marine Electronics Association, NMEA)

协议的全球定位系统定位数据以及实时载波相位差分数据;板卡实时解算卫星数据,并基于载波相位动态实时差分(Real-time kinematic, RTK)技术获得收获机高精度定位定向信息^[19-20],主控芯片是系统核心,主要完成导航路径规划及路径跟踪控制算法;上位机交互系统基于 Android 系统设计,通过串口与导航控制器通信,实现导航数据下发、参数设置、作业路径设置等人机交互功能;功率输出模块内置在导航控制器中,控制器通过功率输出模块控制转向电磁阀的导通时间,实现履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶过程中的转向控制。功率芯片选择具有 MultiSense 模拟反馈的双通道高侧驱动 VND7140AJ 芯片,可以分别控制履带式马铃薯联合收获机左右转向电磁阀。

2 辅助驾驶作业算法设计

马铃薯多直线平行种植,收获机沿垄行直线辅助驾驶,控制挖掘机构、输送机构实现马铃薯的挖掘及输送作业,经人工清选后输送到储粮仓。因此,辅助驾驶作业主要完成路径规划、直线跟踪和作业机构控制 3 部分。

2.1 路径规划

在地头转向过程中,履带式马铃薯联合收获机一侧履带停止,通过滑动进行转向,瞬时转向半径为工作幅宽的一半,由履带接地长度(177 cm)和工作幅宽(110 cm)两者相加可得,地头应留出不少于 287 cm 长的行走及转向幅宽。同时为使未收获行始终位于收获机同一侧,降低算法设计的复杂性,本文采用顺时针的首尾套行作业,如图 5 所示。

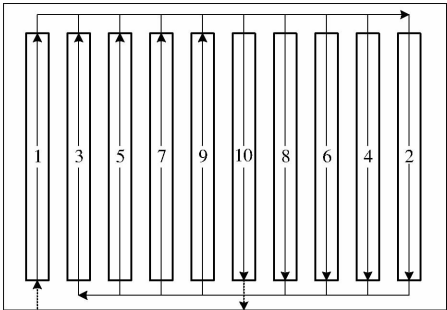


图 5 收获机路径规划示意图

Fig. 5 Schematic of harvester path planning

2.2 直线路径跟踪

马铃薯为土中作物,垄上种植,收获机在进行收获作业时的直线行走示意图如图 6 所示。

图中 A1、A2 等为马铃薯待收获垄行, a_1 、 a_2 等为辅助驾驶系统规划路线,状态 1 为收获机行驶至垄行起点,状态 2 为收获过程,直线 b 为收获机当前实际航向, $\Delta\varphi$ 为收获机行驶过程中的航向偏差, h

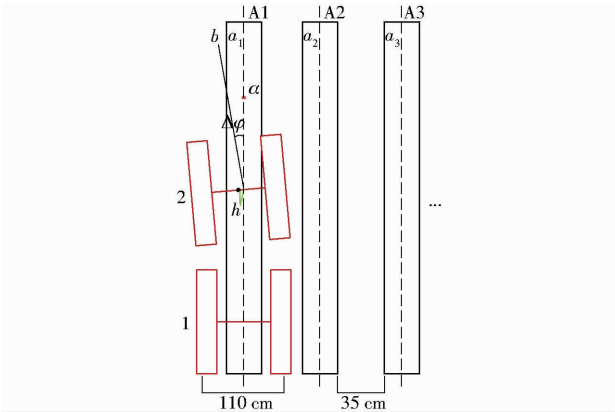


图 6 收获机直线行走示意图

Fig. 6 Schematic of harvester field operation

为横向偏差。

2.2.1 运动学模型

履带式马铃薯收获机田间作业过程中行驶速度较慢,在转向过程中制动侧履带的滑移和转向侧履带的滑转对直线路径跟踪干扰较小。忽略滑移和滑转因素,仅考虑收获机转向时两侧履带的运动状况和转速,收获机运动学模型可简化为两侧差速驱动转向模型,如图 7 所示。

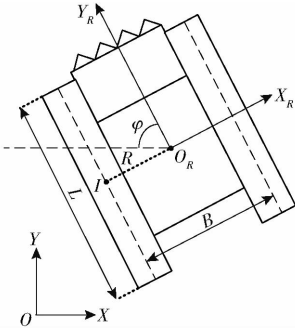


图 7 收获机运动学模型示意图

Fig. 7 Schematic of kinematic model of harvester

XOY 为全局坐标系, $X_R O_R Y_R$ 为固定在收获机重心点的局部坐标系, B 为履带式收获机驱动轮间距, L 为左右履带长度。 Y_R 为收获机当前方向, I 为收获机瞬时运动圆中心。 R 为瞬时转向半径, v 为履带式收获机前进速度、 v_r 、 v_l 分别为左右驱动轮线性速度, $\dot{\varphi}$ 为转向角速度。

以左转向为例,左侧履带停止转动, $v_l = 0$, 右侧履带持续旋转,收获机绕着左侧履带中心点旋转实现转向,两侧履带转速与转向角速度之间的关系为

$$v_l = \dot{\varphi} (R - B/2)$$
 (1)

$$v_r = \dot{\varphi} (R + B/2)$$
 (2)

由公式(1)、(2)得

$$v_r - v_l = \dot{\varphi} B$$
 (3)

根据公式(1)、(3)可得转向角速度 $\dot{\varphi}$ 为

$$\dot{\varphi} = v_r / B$$
 (4)

$$B = 2R$$
 (5)

制策略如表 1 所示。

表 1 收获机辅助驾驶控制策略

Tab.1 Harvester assisted driving control strategy		
状态	执行操作	行驶状态
开始作业	挖掘铲下降→作业离合(合)→行走	怠速→高速
地头转向	挖掘铲抬升→作业离合(分)→转向	高速→低速
停止导航	挖掘铲抬升→作业离合(分)	怠速

3 试验

3.1 试验过程

本文采用和芯星通 UM982 型双天线板卡解算 GNSS 定位及航向信息,定位精度误差小于 1 cm,定向(航向)精度误差小于 0.1°。算法控制频率为 10 Hz。

首先,在水泥路面测试获取联合收获机延时参数。测试方法及步骤为:

- (1)将履带式马铃薯收获机驾驶至水泥路面,并将当前航向设置为初始航向角。
- (2)导航控制器输出指令使履带式马铃薯联合收获机向左转向 2°,在转向超过 2°时输出指令右转恢复到 0°,此时的时间间隔为履带式马铃薯联合收获机的转向控制延时。

其次,为验证本文设计的直线路径跟踪控制方法控制精准度和平稳性,分别在平整水泥路面和平整旱地,速度为 0.55、0.83、1.11 m/s 进行直线路径跟踪试验验证。

最后,为验证履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶系统的稳定性和田间作业性能,在胶州市马铃薯种植地进行收获作业,该地采用直线导航播种,满足直线收获要求。考虑田间收获过程中挖掘作业在较高速度下容易导致作物损伤和雍土现象,以速度 0.55 m/s 进行作业。测试平台及场地如图 10 所示。



图 10 测试平台及场地

Fig.10 Test platform and site

3.2 试验结果分析

3.2.1 延时参数测定结果

延时参数测定过程中航向数据输出结果如图 11 所示,由于 IMU 的零偏不稳定性,航向数据

在一定范围内偏移。延时时间测定结果如图 11 所示。

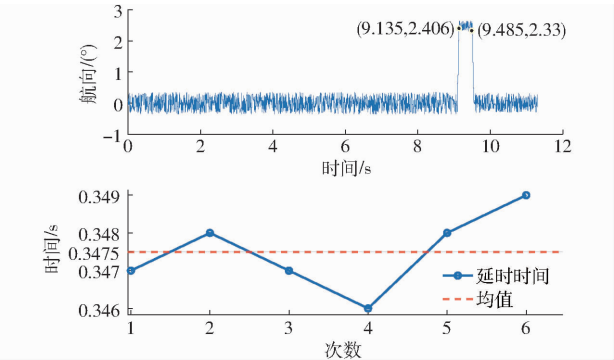


图 11 延时时间测定结果

Fig.11 Delay time measurement result

对试验结果取平均值,保留 3 位有效数字,该履带式马铃薯联合收获机转向控制延时时间为 0.348 s。

3.2.2 辅助驾驶系统稳定性

辅助驾驶作业系统性能试验结果如表 2 所示。

表 2 辅助驾驶作业系统性能试验结果

Tab.2 Results of performance testing for assisted driving operations system					
状态	行驶离合	转向控制	油门控制	挖掘铲状态	作业离合
直线行驶	执行	执行	高速	下降	闭合
行起点	停止	执行	怠速	下降	闭合
行终点	停止	执行	怠速	抬升	分离
地头转向	执行	执行	低速	抬升	分离
停止导航	停止	停止	停止	停止	分离

该结果表明,当马铃薯收获机开始作业后,辅助驾驶系统工作,挖掘铲下降,作业离合接合,开始收获作业,当到达行终点时,挖掘铲自动抬升,作业离合分离,作业控制与人工操作步骤一致,满足作业要求。

3.2.3 直线路径跟踪精度

3 种速度下水泥地面和平整旱田试验跟踪偏差结果如图 12、13 所示。在平整水泥路面进行直线路径跟踪时,3 种速度下平均绝对横向偏差分别为 1.62、1.81、2.16 cm,最大绝对横向偏差分别为 3.50、5.21、5.22 cm;在平整旱地进行直线路径跟踪过程中,3 种速度下平均绝对横向偏差分别为 1.64、1.88、2.32 cm,最大绝对横向偏差分别为 5.01、5.12、5.18 cm。数据表明,平整水泥路面和旱地在相同速度下直线路径跟踪平均绝对横向偏差接近,直线路径跟踪控制算法具有较好的稳定性;随着速度的增加平均绝对横向偏差变大,在较高速度下履带式马铃薯联合收获机路径跟踪性能稍有下降,但横向偏差能始终保持在合理范围中;不同速度下两种环境中直线路径跟踪最大绝对横向偏差相近,可

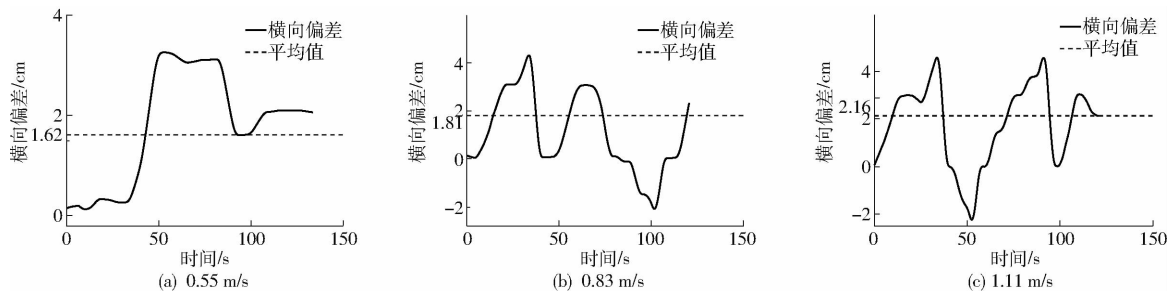


图 12 水泥路面不同速度下横向偏差变化曲线

Fig. 12 Lateral deviations variation curve at different speeds on cement pavement

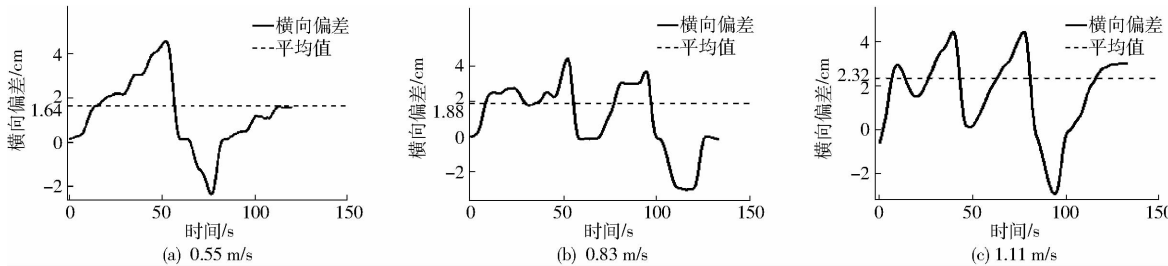


图 13 旱地不同速度下横向偏差变化曲线

Fig. 13 Lateral deviations variation curve at different speeds on dryland

保证履带式马铃薯联合收获机沿垄行进行挖掘收获。

田间作业试验偏差曲线如图 14 所示。田间试验结果表明,在辅助驾驶作业过程中,沿马铃薯种植垄行直线路径跟踪的平均绝对偏差为 2.00 cm,沿已收获垄行的最大绝对横向偏差为 5.10 cm,沿未收获垄行一侧最大绝对横向偏差为 3.12 cm。

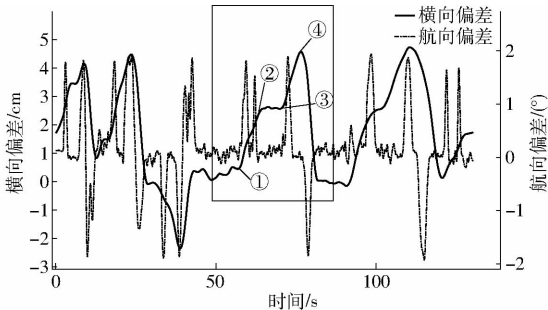


图 14 田间作业偏差曲线

Fig. 14 Field operation deviation curves

由图 14 中位置①到位置②的航向偏差和横向偏差变化趋势可知,此时航向偏差增加,横向偏差小于 5 cm,当航向偏差大于 2°时,辅助驾驶系统进行航向修正,使航向偏差回到 0°,此时出现恒定的横向偏差;由位置③到位置④航向偏差和横向偏差变化趋势可得,此时航向发生变化,航向偏差增加,当横向偏差大于 5 cm 后,控制系统对横向偏差进行快速修正,航向偏差迅速减小,履带式马铃薯联合收获机右偏并进行位置调整,直至横向偏差回到 0 cm。

综合分析,该辅助驾驶系统能够保证收获机在直线路径跟踪过程中,收获机挖掘铲始终在垄行范

围内并能够实现稳定的转向控制,可以保证沿种植垄行的挖掘收获。

4 结论

(1)以洪珠 4ULZ-110 型履带式马铃薯联合收获机为试验平台,根据该履带式马铃薯联合收获机单边制动差速转向和行走特性,设计了履带式马铃薯联合收获机电控系统,实现收获机的转向机构和挖掘机电-液可控。设计辅助驾驶作业系统进行作业控制,试验结果表明该系统作业控制与人工操作步骤一致,满足作业要求。

(2)根据履带式马铃薯联合收获机田间作业要求,基于航向偏差设计 PD 控制器并添加横向偏差的比例项,考虑行走过程中履带式马铃薯联合收获机的行驶速度和控制延时参数,设置转向控制阈值,在遇到较大的航向偏差时进行修正,同时对较大的横向偏差进行及时响应,提高了辅助驾驶系统的稳定性和行走精度。

(3)平整水泥路面和旱地进行直线路径跟踪控制算法试验,结果表明,不同环境中相同速度下直线路径跟踪平均绝对横向偏差接近,最大平均绝对横向偏差分别为 2.16、2.32 cm,直线路径跟踪控制算法具有较好的稳定性;随着速度的增加平均绝对横向偏差变大,在较高速度下履带式马铃薯联合收获机路径跟踪性能下降;田间试验结果表明,履带式马铃薯联合收获机在直线路径跟踪过程中最大绝对偏差为 5.10 cm,平均绝对偏差为 2.00 cm,能准确沿马铃薯种植垄行挖掘收获作业。

参 考 文 献

[1] JOHNSON C M, AUAT C F. Machinery for potato harvesting: a state-of-the-art review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14:1156734.

[2] 王公仆,蒋金琳,田艳清,等. 马铃薯机械收获技术现状与发展趋势[J]. *中国农机化学报*, 2014, 35(1): 11 – 15, 21.
WANG Gongpu, JIANG Jinlin, TIAN Yanqing, et al. Present status and prospects of mechanical potato harvest technology[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(1): 11 – 15, 21. (in Chinese)

[3] 窦青青,孙永佳,孙宜田,等. 国内外马铃薯收获机械现状与发展[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(9): 206 – 210.
DOU Qingqing, SUN Yongjia, SUN Yitian, et al. Current situation and development of potato harvesting machinery at home and abroad[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(9): 206 – 210. (in Chinese)

[4] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 1 – 16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3): 1 – 16. (in Chinese)

[5] 李涛,杨敏丽,张雄,等. 西北地区马铃薯机械化生产技术与差异性研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊1): 307 – 313.
LI Tao, YANG Minli, ZHANG Xiong, et al. Potato production technology and difference of mechanization level in northwest China [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Supp. 1): 307 – 313. (in Chinese)

[6] YIN X, WANG Y X, CHEN Y L, et al. Development of autonomous navigation controller for agricultural vehicles[J]. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.*, 2020, 13(4): 70 – 76.

[7] 韩振浩,朱立成,苑严伟,等. 山地果园履带底盘坡地通过性能分析与优化设计[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(5): 413 – 421, 448.
HAN Zhenhao, ZHU Licheng, YUAN Yanwei, et al. Analysis of slope trafficability and optimized design of crawler chassis in hillside orchard[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(5): 413 – 421, 448. (in Chinese)

[8] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(8): 1 – 18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 1 – 18. (in Chinese)

[9] JIA B, SUN W, ZHAO Z, et al. Design and field test of a remotely controlled self-propelled potato harvester with manual sorting platform[J]. *American Journal of Potato Research*, 2023, 100(3): 193 – 209.

[10] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 1 – 18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 1 – 18. (in Chinese)

[11] 王淑红,高爱民,孟养荣,等. 马铃薯收获机现状及发展趋势[J]. *林业机械与木工设备*, 2023, 51(8): 12 – 16.
WANG Shuhong, GAO Aimin, MENG Yangrong, et al. The current situation and development trend of potato harvesters[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2023, 51(8): 12 – 16. (in Chinese)

[12] 付拓,毛文华,张小超,等. 一种履带拖拉机自动驾驶转向控制方法[J]. *农业工程*, 2018, 8(1): 84 – 88.
FU Tuo, MAO Wenhua, ZHANG Xiaochao, et al. Steering control method of caterpillar tractor fitted with automatic navigat system[J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(1): 84 – 88. (in Chinese)

[13] 王法安,杨全合,张兆国,等. 基于 ICR 的履带车辆路径跟踪与转向控制算法研究[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(1): 386 – 395, 425.
WANG Fa'an, YANG Quanhe, ZHANG Zhaoguo, et al. Research on path tracking and turning control algorithm of tracked vehicle based on ICR[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(1): 386 – 395, 425. (in Chinese)

[14] 刘志杰,王小乐,任志刚,等. 基于虚拟雷达模型的履带拖拉机导航路径跟踪控制算法[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 376 – 385.
LIU Zhijie, WANG Xiaole, REN Zhigang, et al. Crawler tractor navigation path tracking control algorithm based on virtual radar model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 376 – 385. (in Chinese)

[15] 胡炼,关锦杰,何杰,等. 花生收获机自动驾驶作业系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 21 – 27.
HU Lian, GUAN Jinjie, HE Jie, et al. Design and experiment of automatic driving operation system of peanut harvester based on BDS[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(9): 21 – 27. (in Chinese)

[16] 宋裕民,梁健明,邱绪云,等. 履带式拖拉机运动控制系统设计与试验[J]. *农机化研究*, 2019, 41(7): 242 – 248.
SONG Yumin, LIANG Jianming, QIU Xuyun, et al. Design and test of motion control system for crawler tractor[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(7): 242 – 248. (in Chinese)

[17] 王法安,曹钦洲,李彦彬,等. 丘陵山区自走式马铃薯联合收获机设计与通过性试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(增刊2): 10 – 19.
WANG Fa'an, CAO Qinzhou, LI Yanbin, et al. Design and trafficability experiment of self-propelled potato harvester in hilly and mountainous areas[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(Supp. 2): 10 – 19. (in Chinese)

Conference on Big Data and Smart Computing, 2020:613 – 616.

[20] LAMPLE G, BALLESTEROS M, SUBRAMANIAN S, et al. Neural architectures for named entity recognition[C] // 15th Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics, 2016:260 – 270.

[21] DEVLIN J, MING-WEI C, LEE K, et al. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding [C] // 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics, 2019:4171 – 4186.

[22] SUN Z, LI X, SUN X, et al. ChineseBERT: Chinese pretraining enhanced by glyph and pinyin information[C] // Joint Conference of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing, 2021:2065 – 2075.

[23] MIKOLOV T, CHEN K, CORRADO G, et al. Efficient estimation of word representations in vector space[C] // 1st International Conference on Learning Representations, 2013:1 – 12.

[24] 郭旭超,唐詹,刁磊,等. 基于部首嵌入和注意力机制的病虫害命名实体识别[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 335 – 343.

GUO Xuchao,TANG Zhan,DIAO Lei,et al. Recognition of Chinese agricultural diseases and pests named entity with joint radical-embedding and self-attention mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 2): 335 – 343. (in Chinese)

[25] 孙振,李新福. 多特征融合的中文电子病历命名实体识别[J]. 计算机工程与应用, 2023,59(23): 136 – 144.

SUN Zhen,LI Xinfu. Named entity recognition of Chinese electronic medical records based on multi-feature fusion[J]. Computer Engineering and Applications, 2023,59(23): 136 – 144. (in Chinese)

[26] SUNDERMEYER M, SCHLUTER R, NEY H. LSTM neural networks for language modeling[C] // 13th Annual Conference of the International Speech Communication Association, 2012:194 – 197.

[27] WOO S, PARK J, LEE J, et al. CBAM: convolutional block attention module[C] // 15th European Conference on Computer Vision, 2018:3 – 19.

[28] LIU Y, ZHOU Y, WEN S, et al. A strategy on selecting performance metrics for classifier evaluation[J]. International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications, 2014, 6(4): 20 – 35.

[29] ESPINDOLA R P, EBECKEN N F. On extending f-measure and g-mean metrics to multi-class problems[J]. WIT Transactions on Information and Communication Technologies,2005,35: 25 – 34.

[30] CHO K, VAN MERRIENBOER B, GULCEHRE C, et al. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation[C] // Doha, Qatar, Association for Computational Linguistics (ACL), 2014:1724 – 1734.

[31] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[C] // Advances in Neural Information Processing Systems, 2017:5999 – 6009.

(上接第 238 页)

[18] 魏忠彩,王兴欢,李学强,等. 履带自走式分拣型马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2): 95 – 106.

WEI Zhongcai, WANG Xinghuan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(2): 95 – 106. (in Chinese)

[19] 孟志军,王昊,付卫强,等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2023,54(10): 1 – 24.

MENG Zhijun,WANG Hao,FU Weiqiang,et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10): 1 – 24. (in Chinese)

[20] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动驾驶作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 15 – 21.

LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 15 – 21. (in Chinese)

[21] RUSTAMOV R B, HASANOVA S, ZEYNALOVA M H. Multi-purposeful application of geospatial data [M] // LEE J. Introduction to Navigation Systems. London: IntechOpen, 2018: 3 – 18.

[22] 谭宝成,邓子豪. GPS 导航系统下坐标转换及应用[J]. 西安工业大学学报,2014,34(6): 504 – 510.

TAN Baocheng,DENG Zihao. Realization of the coordinate transformation method in GPS navigation system[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2014,34(6): 504 – 510. (in Chinese)

[23] 宋丽,艾长胜,孙崇书,等. 基于高精度卫星差分定位的组合导航研究[J]. 现代信息科技,2022,6(15): 37 – 40,44.

SONG Li, AI Changsheng, SUN Chongshu, et al. Research on integrated navigation based on high precision satellite differential positioning[J]. Modern Information Technology, 2022,6(15): 37 – 40,44. (in Chinese)